



**University of  
Zurich**<sup>UZH</sup>

**Zurich Open Repository and  
Archive**

University of Zurich  
University Library  
Strickhofstrasse 39  
CH-8057 Zurich  
[www.zora.uzh.ch](http://www.zora.uzh.ch)

---

Year: 2011

---

## **Die Entstehung der Hirn-Computer-Analogie. Tücken und Fallstricke bei der Technisierung des Gehirns**

Christen, Markus

Posted at the Zurich Open Repository and Archive, University of Zurich

ZORA URL: <https://doi.org/10.5167/uzh-63496>

Book Section

Published Version

Originally published at:

Christen, Markus (2011). Die Entstehung der Hirn-Computer-Analogie. Tücken und Fallstricke bei der Technisierung des Gehirns. In: Klinnert, Lars; Markus, Peter. Die Zukunft des menschlichen Gehirns : ethische und anthropologische Herausforderung der modernen Neurowissenschaften. Schwerte: Institut für Kirche und Gesellschaft, 135-154.

## Die Entstehung der Hirn-Computer-Analogie. Tücken und Fallstricke bei der Technisierung des Gehirns<sup>1</sup>

„The nervous system is a communication machine and deals with information. Whereas the heart pumps blood and the lung effects gas exchange, whereas the liver processes and stores chemicals and the kidney removes substances from the blood, the nervous system processes information.“<sup>2</sup>

Das Gehirn ist eine informationsverarbeitende Maschine, so das obige Zitat. Kaum eine naturwissenschaftlich gebildete Person würde diese Aussage heutzutage grundlegend in Frage stellen<sup>3</sup>. Sie würde aber auch festhalten, dass mit dieser Aussage nicht viel gewonnen ist. Sie würde insbesondere bestreiten, dass mit „Informationsverarbeitung“ das gemeint ist, was tagtäglich in den immer raffinierter werdenden Prozessoren unserer Computer geschieht. Denn wissenschaftlich gesehen ist die Gehirn-Computer-Analogie tot, wenn mit dem Begriff „Computer“ die heute zum Alltag gehörenden Computersysteme gemeint sind, die noch zur Hochblüte der Kybernetik allgemein für Erstaunen gesorgt haben. Allerdings ändert sich derzeit die Vorstellung, was ein Computer ist – und hier bahnt sich die Möglichkeit an, dass diese Analogie eine neue Blüte erreichen

<sup>1</sup> Dieser Beitrag ist eine deutschsprachige Zusammenfassung des historischen Teils der Dissertation „The role of spike patterns in neuronal information processing. A historically embedded conceptual clarification“ (Zürich 2006). Darin finden sich auch ausführlichere Literaturhinweise. Die Forschungen von Markus Christen werden vom Projekt Nr. 100011-116725 des Schweizerischen Nationalfonds unterstützt.

<sup>2</sup> Perkel, D. H. / Bullock, T. H., 1968, 227.

<sup>3</sup> Hier sei bemerkt, dass der Begriff „Maschine“ auch im naturwissenschaftlichen Kontext Anlass zu Diskussionen geben kann, wobei aber festzuhalten ist, dass bei diesem Begriff in den vergangenen Jahren eine Bedeutungsverschiebung stattgefunden hat. In den Naturwissenschaften wird er heute auch für natürliche Systeme (z. B. „molekulare Maschinen“) angewendet, die nicht geplant, designt und konstruiert wurden, wie dies der klassische Maschinenbegriff impliziert. Darüber hinaus stellt sich die Frage, ob die Charakterisierung des Gehirns als „informationsverarbeitende“ Maschine dieses vollständig charakterisiert. Die Beantwortung dieser Frage muss berücksichtigen, wie unscharf und umfassend der Informationsbegriff ist, der jeweils verwendet wird.

kann. Freilich unter einem anderen Vorzeichen: Der Computer ist dann nicht mehr das epistemische Erklärungsraster für neuronale Informationsverarbeitung. Vielmehr soll das Gehirn Vorbild werden für neue Arten von Computern – eine Vorstellung, die Teil einer umfassenden „Informatisierung“<sup>4</sup> ganzer Wissenschaftsbereiche ist. Dieser Punkt wird uns aber erst am Schluss dieser Betrachtung beschäftigen.

Im Zentrum dieser Arbeit steht die erste Phase des Einbruchs der Informationsmetaphorik in die Neurowissenschaft, als die Begriffe „Kanal“ (channel), „Code“ (code), „Rauschen“ (noise), und „Informationsverarbeitung“ (computation) Eingang in den Begriffsapparat der Hirnforschung fanden. (Ich verwende dafür nachfolgend die Bezeichnung „Informatisierung“.) In diesem Zeitraum, der sich grob zwischen 1940 bis 1970 lokalisieren lässt, entwickelte sich die Analoge von Gehirn und Computer, die sich auf der populären Ebene auch heute noch im Sprachgebrauch findet – etwa wenn mit „Festplatte“ das Gedächtnis bezeichnet wird. Diese Phase ist für ein Verständnis der Technisierung des Gehirns zweifellos bedeutsam, weil sich zeigen lässt, wie widerspenstig sich die „wetware“ Gehirn gegenüber einer Einspannung in das informationstheoretische Raster verhalten hat. So hat beispielsweise die Metaphorik des „Codes“, die sich in der Genetik der 1950er und 1960er Jahre als sehr wirkmächtig erwiesen hat<sup>5</sup>, in der Neurowissenschaft bislang keine vergleichbare Karriere gemacht. So stammt das o. g. Zitat aus einer Publikation, die gleichsam den Höhepunkt der ersten Informatisierungsphase der Hirnforschung markiert, in welcher 43 potenzielle neural codes vorgestellt wurden – offenbar hatte der Begriff „Code“ nicht die gewünschte vereinheitlichende Funktion.

Dieser Beitrag zeigt die Eckpunkte der Entstehung der Gehirn-Computer-Analoge im Zug der Informatisierung der Hirnforschung anhand dreier Schritte: In einem ersten Schritt wird der Kontext skizziert, in dem diese Entwicklung stattfand. Von besonderem Interesse ist hier die aufkommende Kybernetik, deren kulturgeschichtliche Bedeutung in jüngster Zeit in zahlreichen Publikationen genau untersucht worden ist<sup>6</sup>. Im zweiten Schritt werden die (primär na-

4 Gemeint ist hier nicht die Nutzung von Informatik in den Wissenschaften, sondern die Beschreibung natürlicher Vorgänge als informationsverarbeitende Prozesse, wie sich das derzeit beispielsweise in der Systembiologie ausprägt. Eine trennscharfe Unterscheidung hinsichtlich dieser beiden Aspekte ist aber nicht möglich, zumal gerade die Simulationsforschung und -nutzung ein wichtiger Moderator dieser Entwicklung ist.

5 Vgl. dazu Kay, L. E., 2000.

6 Vergleiche dazu beispielsweise Hagner, M. / Hörl, E., 2008; Pias, C., 2003; Pias, C., 2004.

turwissenschaftlichen) Voraussetzungen dargelegt, deren Klärung Voraussetzung für die Anwendung der Informations-Begrifflichkeit war. Drittens wird anhand der wissenschaftlichen Begriffe „code“, „noise“, „channel“ und „computation“ aufgezeigt, mit welchen Schwierigkeiten die Forscher der damaligen Zeit kämpften, um diese aus der Informationstheorie und Kybernetik stammende Begrifflichkeit für ihre Fragestellungen nutzbar zu machen. Dies zeigt exemplarisch die Tücken und Fallstricke, denen sich auch die heutigen Versuche zur Technisierung des Gehirns nicht entziehen können. Schlussfolgerungen, die sich aus dieser Entwicklung für die jetzt sehr prominent vorangetriebene Informatisierung der Lebenswissenschaften schließen lassen, bilden den Abschluss dieser Betrachtung.

### 1. Umfeld: Das beginnende Informationszeitalter

Der Einbruch der Informationsmetaphorik in die Neurowissenschaft ist kein singuläres Ereignis, sondern gekoppelt an einen Prozess, der von William Aspray als „Konzeptualisierung der Information“<sup>7</sup> bezeichnet wurde. Innert gut einer Dekade um den Zweiten Weltkrieg hatten fünf Forscher – Warren McCulloch, Walter Pitts, Claude Shannon, Alan Turing und John von Neumann – wichtige Beiträge geliefert, die eine formale Engfassung und Quantifizierung der Begriffe „Information“ und „Verarbeitung von Information“ (computation) erlaubten. Sie hatten ihre Arbeiten auch als Ansatzpunkte für das Verständnis neuronaler Vorgänge angesehen, obgleich sie im Zug ihrer wissenschaftlichen Arbeit mit dem „biologischen Gehirn“ kaum in Berührung kamen<sup>8</sup>. Das Wirken dieser fünf Personen ist wissenschaftshistorisch gut untersucht, sodass an dieser Stelle nur einige allgemeine Bemerkungen folgen sollen.

Ein Markstein des beginnenden Informationszeitalters war die Kybernetik, die sich ab den 1940er Jahren entwickelte und im 1948 erschienenen Buch „Cybernetics, or control and communication in the animal and the machine“ von Norbert Wiener<sup>9</sup> ihren Leitstern fand. Die Reaktion auf dieses Werk war weitreichend; die Kybernetik trat gar mit dem Anspruch auf, „das Gravitations-

7 Aspray, W., 1985.

8 Warren McCulloch bildet hier eine Ausnahme. Er erhielt eine Ausbildung in Neurophysiologie und arbeitete dann sowohl in diesem Bereich als auch in der Psychiatrie. Seine wissenschaftliche Arbeit beeinflusste aber vorab die technischen Wissenschaften. Vgl. dazu Christen, M., 2008.

9 Vgl. Wiener, N., 1948.

zentrum der verschiedenen Wissenschaftskulturen und der Technik zu bilden“<sup>10</sup>. Für unsere Zwecke bedeutsam ist das epistemische Ideal, das die Kybernetik hinsichtlich der Erklärung auch neurobiologischer Vorgänge bereit stellte. Am deutlichsten formulierte Wiener dieses 1950 zusammen mit dem mexikanischen Arzt und Physiologen Arturo Rosenblueth:

„We believe that men and other animals are like machines from the scientific standpoint because we believe that the only fruitful methods for the study of human and animal behavior are the methods applicable to the behavior of mechanical objects as well. Thus, our main reason for selecting the terms in question was to emphasize that, as objects of scientific enquiry, humans do not differ from machines.“<sup>11</sup>

Ausgehend von dieser programmatischen Feststellung wurde nicht nur das Fundament gelegt, um das Nervensystem als communication machine anzusehen, sondern es wurde auch ein Kriterium mitgeliefert, wann man dieses System verstanden hat: wenn man es erfolgreich nachbauen kann. In zahlreichen Schriften von Kybernetikern und Neurowissenschaftlern ab den 1950er Jahren fand sich sinngemäß dieses epistemische Ideal.

Gestorben ist aber zweifellos die Kybernetik als wissenschaftliches Gebiet – u. a. weil sie ihren Anspruch als vereinheitlichende Wissenschaft nicht einlösen konnte. Auch hinsichtlich der Informatisierung der Neurowissenschaft war die Kybernetik weniger bedeutsam als ein zweiter Eckpfeiler der Konzeptualisierung von Information, die Informationstheorie. Kristallisationspunkt für diese bildete die 1948 erschienene Arbeit „A mathematical theory of communication“<sup>12</sup> von Claude Shannon. Dieses Werk hatte eine mit Wieners „Cybernetics“ vergleichbare Wirkungsgeschichte, obgleich es sehr technisch geschrieben war, primär die Nachrichtentechnik fokussierte und in einem sehr spezialisierten wissenschaftlichen Magazin erschien. Shannons konzise mathematische Beschreibung eines Kommunikationsvorgangs, die die semantischen Aspekte von Information ausklammerte, weckte das Interesse des Mathematikers Warren Weaver vom Rockefeller Institute. Er publizierte 1949 die Arbeit mit einer Einleitung versehen als Buch, das sogleich großes Interesse in unterschiedlichsten wissenschaftlichen Disziplinen weckte. Diese „Popularisierung“ der Informationstheorie wurde von einer Reihe von Konferenzen begleitet, in denen ihre Anwendungen in Gebieten wie Linguistik, Psychologie und eben auch Neurophysiologie (den

10 Hagner, M. / Hörl, E., 2008, 38.

11 Rosenblueth, A. / Wiener, N., 1950, 320.

12 Vgl. Shannon, C. E., 1948.

Begriff „Neurowissenschaft“ bzw. „neuroscience“<sup>13</sup> gab es damals noch nicht) debattiert wurde.

Viele dieser Versuche zur Nutzung der Informationstheorie außerhalb der Nachrichtentechnik wurden aufgegeben, weil die realen Prozesse, auf denen das Vokabular der Informationstheorie angewendet wurde, sich als zu störrisch erwiesen hatten, um sinnvolle Fragestellungen zu generieren. Im Gegensatz zur Kybernetik hat sich die Informationstheorie aber als respektable Disziplin bis heute halten können, zumal sie in der Nachrichtentechnik klar umrissene Probleme hatte und diese auch lösen konnte.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Kybernetik gewissermaßen das epistemisch-kulturelle Fundament und die Informationstheorie das begriffliche Material für die Informatisierung des Gehirns geliefert haben<sup>14</sup>. Dass, wie nachfolgend gezeigt wird, die nutzbringende Anwendung des Informationsvokabulars in der Hirnforschung im ersten Anlauf weitgehend missglückte, kann wiederum nicht auf den Niedergang der Kybernetik zurückgeführt werden. Vielmehr war es die faktische Störrichkeit des Gehirns und des neuronalen Gewebes in den Laboratorien der Neurophysiologie, die zu diesem Scheitern führte.

## 2. Voraussetzungen: Neuronen und ihre Botschaften

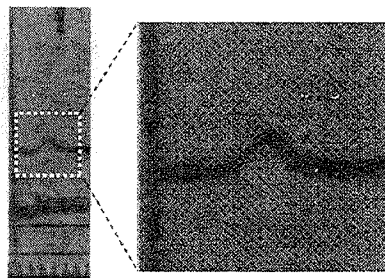
Die Informatisierung des Gehirns ist nicht allein die Folge geeigneter Rahmenbedingungen und neu aufkommender Theorien, deren Anwendung auf andere Gebiete die Forscher reizt. Auch im potenziellen Anwendungsfeld selbst müssen die wissenschaftlichen Objekte, welche mit den von der Theorie geforderten Entitäten in Bezug gesetzt werden können, zuerst geschaffen werden. Diese Anwendungsbedingungen sollen hier kurz diskutiert werden.

Vorab zwei Objekte wurden in den ersten drei Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts als „funktionale Grundelemente“ des Nervensystems etabliert: zum einen die Nervenzelle als Baustein des Nervensystems, zum anderen der Nervenimpuls (spike) als Grundelement der „Botschaften“, die Nervenzellen untereinander austauschen. Die Durchsetzung der „Neuronendoktrin“ ist gut untersucht<sup>15</sup>, sodass ich mich nachfolgend auf letzteren Punkt beschränke.

13 Der Begriff „neuroscience“ wurde vermutlich erstmals vom Neurophysiologen Ralph Gerard in den späten 1950er Jahren verwendet.

14 Dies gilt vorab für die Begriffe „channel“, „noise“ und „code“, während man die Begriffe „computation“ bzw. „information processing“ eher der Kybernetik zuordnet.

15 Vgl. dazu beispielsweise Shepherd, G. M., 1991.



1915

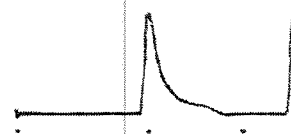


Fig. 2

1922

Abb. 1: Links ein „action current“, gemessen 1915 mit dem Saitengalvanometer, die untere Sinuskurve markiert Zeitintervalle von 10 ms (nach Forbes, A., 1915). Rechts ein Nervenimpuls gemessen mit einem Röhrenverstärker und abgezeichnet von einem Oszilloskop; die Punkte markieren ein Zeitintervall von 1 ms (nach Gasser, H. S. / Erlanger, J., 1922).

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde in der wissenschaftlichen Literatur die elektrische Aktivität von Nervenzellen mit Begriffen wie „Nervenenergie“ oder „action current“ beschrieben. Für einen detaillierten Blick auf diese „Aktivität“ fehlte es hingegen an geeigneten Messgeräten. Erst der Saitengalvanometer erlaubte es, neuronale Aktivität zu messen und (mittels Fotoplatte) aufzuzeichnen. Ein frühes Beispiel einer solchen Messung publizierten Alexander Forbes und Alan Gregg im Jahr 1915. Das Bild zeigte die neuronale Aktivität keineswegs als ein „diskretes“ Ereignis, sondern eher als ein sich über beinahe 20 Millisekunden erstreckendes elektrisches Phänomen, das in einer ganzen Nervenfaser gemessen wurde (siehe Abb. 1, links). Die Verbreitung der Elektronenröhre ermöglichte dann den Bau von Verstärkern, welche die Auflösung zur Untersuchung des Phänomens deutlich verbesserte. In Kombination mit einem Oszilloskop gelang es zu Beginn der 1920er Jahre mehreren Forschergruppen, die „Nervenenergie“ nun tatsächlich wie einen scharfen Impuls aussehen zu lassen, so beispielsweise Herbert Spencer Gasser und Joseph Erlanger (siehe Abb. 1, rechts).

Ein derart visualisiertes, klar umrissenes Ereignis erlaubte es, eine Verbindung zwischen dem Nervenimpuls und dessen Bedeutung wissenschaftlich an-

zugehen. Die hier entscheidende Figur war der britische Physiologe Edgar Adrian (1889–1977). In zahlreichen Experimenten maß er in den 1920er Jahren die elektrische Aktivität in sensorischen Nervenzellen des Froschs, um den Zusammenhang zwischen Stärke des Stimulus und der dadurch erzeugten neuronalen Aktivität zu bestimmen<sup>16</sup>. Er führte dabei die Begriffe „message“ und „information“ in Zusammenhang mit der messtechnischen Erfassung neuronaler Aktivität ein<sup>17</sup>, wobei er die linguistische Konnotation durchaus ernst nahm: „[...] the message may be like a succession of numbers, or words, sentences.“<sup>18</sup> Eine solche Betrachtungsweise stieß aber auf Kritik. Charles Scott Sherrington, einer der bedeutendsten Neurophysiologen jener Zeit, wandte sich noch 1940 dagegen, Begriffe wie „message“ oder „signal“ zur Beschreibung der neuronalen Aktivität zu verwenden<sup>19</sup>.

Ein genauer Blick auf die Arbeitsweise von Adrian macht deutlich, dass die durch ihn geleistete Verknüpfung eines diskreten „Alles-oder-nichts-Ereignisses“ mit „Information“ keineswegs ein schlichter Akt der Beobachtung war. Das bekannte Problem der Theoriegeladenheit von wissenschaftlichen Beobachtungen<sup>20</sup> lässt sich hier gut illustrieren. So musste Adrian beispielsweise sicher stellen, dass die von ihm gemessenen Impulse alle zur selben „Botschaft“ gehörten. Die Platzierung der Elektrode war zu ungenau, um sicher zu sein, dass nur ein Nervenstrang gemessen wurde. Deshalb postulierte Adrian, dass einzelne Nervenzellen in regelmäßigen Abständen feuern würden und man demnach dann die „Botschaft“ einer einzigen Nervenzelle erfassen würde, wenn in der Tat ein regelmäßiges Muster erkennbar sei: „[...] it is not surprising that an end-organ should produce a regular series of discharges under a steady stimulation: it would have been much more so had the discharge been irregular.“<sup>21</sup>

Solche theoretischen Vorannahmen zwecks Etablierung eines wissenschaftlichen Objekts sind nicht überraschend und verschwinden auch nicht im Zug des Voranschreitens der Messtechnik<sup>22</sup>. Adrian fehlte es aber noch am begrifflichen Apparat für eine wirkliche Informatisierung seiner Beobachtungen. Sein Reden von Botschaft und Information war nicht theoretisch gefestigt, was sich bei-

16 Eine erste Zusammenfassung seiner Arbeit lieferte er in Adrian, E. A., 1928.

17 Vgl. Garson, J., 2003.

18 Adrian, E. D., 1932, 17.

19 Vgl. dazu Sherrington, C. S., 1951, 168.

20 Vgl. Duhem, P., 1978.

21 Adrian, E. D. / Zotterman, Y., 1926, 157.

22 Vgl. dazu beispielsweise Hardcastle V. G. / Stewart, C., 2003.

spielsweise darin zeigt, dass er beide Begriffe austauschbar verwendete. Auch bot das zu messende System bereits damals einige Überraschungen. So fanden beispielsweise die amerikanischen Physiologen E. A. Blair und Joseph Erlanger eine erstaunliche Variabilität in der neuronalen Reaktion gleicher Neuronen auf gleiche Reize und es begann die Suche nach den Ursachen dieser Variabilität – die man vom Standpunkt eines Ingenieurs auch als „Unzuverlässigkeit“ bezeichnen könnte. Dennoch haben die Arbeiten der 1920er und 1930er Jahre die wissenschaftlichen Voraussetzungen geschaffen, dass später das informationstheoretische Vokabular einen Anknüpfungspunkt fand: Nervenzellen mit ihren Axonen als Kanal, „digitale“ Spikes als mögliche Bausteine eines Codes und Variabilität als eine Form von Rauschen.

### 3. Geburt mit Hindernissen: Das informationsverarbeitende Gehirn

#### 3.1. Kanal-Kapazitäten berechnen

Shannons bekanntes Schema eines generalisierten Kommunikationssystems (siehe Abb. 2) bildete ein Raster, das in zahlreichen Forschungsgebieten, zumindest auf dem ersten Blick, interessante Forschungsfragen generierte – so auch in den Neurowissenschaften. Die erste offensichtliche Fragestellung war, welche Kanalkapazität ein „neuronaler Kanal“ hat – also wie viel Information (gemessen in Bit) pro Sekunde über einen solchen Kanal (z. B. einen Nerv) transferiert werden kann.

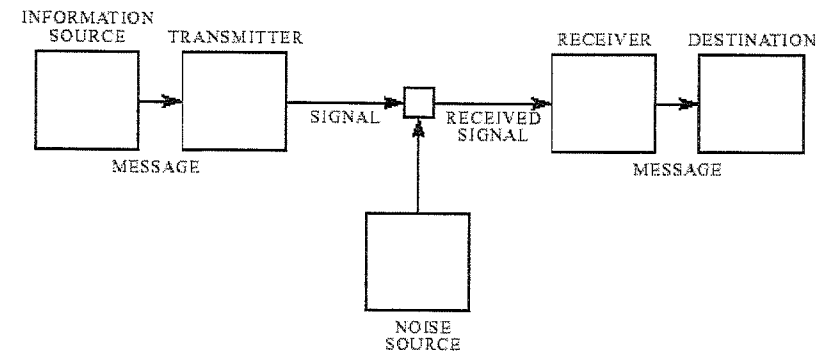


Fig. 1 —Schematic diagram of a general communication system.

Abb. 2: Allgemeines Schema eines Kommunikationssystems nach Shannon, C., 1948: Der Transmitter kodiert die Botschaft, sodass das Signal über einen Kanal zum Empfänger gelangt, wobei das Signal durch Rauschen verändert werden kann.

Bereits 1950 und 1951 wurden erste Abschätzungen für den akustischen bzw. optischen „Kanal“ (Hör- und Sehsinn) des Menschen publiziert<sup>23</sup>. Auch in den neurophysiologischen Labors wurde das Problem angegangen – und zwar von den Protagonisten einer „kybernetischen“ Sichtweise des Nervensystems. Warren McCulloch publizierte zusammen mit Donald MacKay 1952 eine erste Abschätzung, wie viel „Information“ eine einzelne Nervenzelle zu übermitteln vermag<sup>24</sup>. Das genaue Resultat interessierte McCulloch aber nicht. Vielmehr ging es ihm darum zu zeigen, dass die informationstheoretische Betrachtung auch evolutionsbiologisch Sinn macht. Das Nervensystem wird zum optimalen Informationskanal:

„All living things have to find energetic Lebensraum between highly organized energy of light from the sun and ultimate heat-death – Warmetod. [...] Since the nervous system has contact with the totality of the world [...] by means of signals, I thoroughly expect that when we understand its ineluctable limitation, we will find that it maximizes the transmission of information by proper coding.“<sup>25</sup>

23 Vgl. Jacobson, H., 1950; Jacobson, H., 1951.

24 Vgl. MacKay, D. M. / McCulloch, W., 1952.

25 Wall, P. D. / Lettvon, J. Y. / McCulloch, W. / Pitts, W., 1956, 343.

Freilich verlangt die strikte Anwendung des informationstheoretischen Apparates die Beantwortung zentraler Fragen, was die damalige Neurophysiologie nicht leisten konnte. So musste insbesondere geklärt werden, auf welcher Zeitskala die Kodierung stattfinden soll. (Grob: Über welches Zeitintervall soll sich ein „Symbol“ der neuronalen Botschaft erstrecken?) McCulloch hatte hier klare theoretische Vorstellungen, die er bereits 1943 zusammen mit Walter Pitts publizierte<sup>26</sup>. Er dachte im Rahmen einer diskreten Welt und zerstückelte den Zeitstrahl in regelmäßige Intervalle, in welchen entweder ein Symbol (ein „spike“) vorkommt oder nicht. In dieser diskreten Welt kam er 1952 auf eine Obergrenze von 3.000 bit/sec. Doch eine andere einflussreiche Figur, der theoretische Biologe Anatol Rapoport, bestritt diesen Wert später und schätzte die Obergrenze auf 4.000 bit/s<sup>27</sup>. Grund dafür war, dass Rapoports mathematische Sicht der Welt eine kontinuierliche war, also in den reellen und nicht den rationalen Zahlen wurzelte. Es waren diese Unterschiede in tiefgreifenden theoretischen Grundannahmen, welche die voneinander abweichenden Schätzwerte generierten – nicht aber wirkliche Experimente.

McCulloch u. a. wagten 1955 einen erneuten Versuch zur Messung der neuronalen Kanalkapazität<sup>28</sup>. Sie ermittelten zahlreiche Faktoren, die solche Messungen beeinflussen könnten und verzichteten darauf, eine Abschätzung überhaupt nur zu publizieren. Dennoch war das Thema nicht gestorben. Noch bis zu Beginn der 1970er Jahre versuchten mehrere Laboratorien, neuronale Kanalkapazitäten experimentell zu bestimmen, wobei sie sich immer auf theoretische Annahmen stützen mussten, wie die Kodierung der Information vonstatten gehen könnte<sup>29</sup>. Die Mehrzahl der Neurophysiologen hielten diese Bemühungen aber für fruchtlos, sodass das Thema „Kanalkapazität“ als wissenschaftliche Fragestellung in der Hirnforschung schließlich ausstarb. Diese Problemstellung war dennoch prägend für jene Neurowissenschaftler, die sich später vertiefend mit der Frage der neuronalen Informationsverarbeitung auseinander setzten<sup>30</sup>.

26 Die hierzu zentrale Arbeit ist McCulloch, W. / Pitts, W., 1943.

27 Vgl. Rapoport, A. / Horvath, W., 1960.

28 Vgl. Wall, P. D. / Lettvin, J. Y. / McCulloch, W., Pitts, W., 1956.

29 Eine Übersicht dazu lieferte Färber, G., 1968.

30 So publizierte beispielsweise Moshe Abeles zu Beginn seiner Karriere über das Thema der neuronalen Kanalkapazität. Vgl. Abeles, M. / Lass, Y., 1975.

### 3.2. Den neuronalen Code knacken

Die Frage nach dem „neuronalen Code“ stellte sich – direkt oder indirekt – bei allen praktischen Anwendungen des informationstheoretischen Vokabulars auf das Nervensystem. Die Rede von einem „Code“ tauchte erstmals im Umfeld der entstehenden Kybernetik auf. So hat John von Neumann auf der Macy-Konferenz von 1950 explizit diese Begrifflichkeit verwendet – allerdings mit einem skeptischen Unterton:

„It seems to me that we do not know at this moment to what extent coded messages are used in the nervous system. It certainly appears that other types of messages are used, too; hormonal messages, which have a ‚continuum‘ and not a ‚coded‘ character, play an important role and go to all parts of the body. Apart from individual messages, certain sequences of messages might also have a coded character. [...] The last question that arises in this context is whether any of the coded ways in which messages are sent operate in any manner similar to our digital system.“<sup>31</sup>

Auch andere Teilnehmer der damaligen Besprechung sprachen vom einem eher „obskuren Charakter“ (Gregory Bateson) der Code-Begrifflichkeit im Nervensystem. Dennoch fand das Thema nachfolgend das Interesse von Neurophysiologen wie Kybernetikern – und zwar unabhängig von der Frage der neuronalen Kanalkapazität. Dabei zeigte sich von Anbeginn, dass der Begriff „Code“ für unterschiedliche Formen neuronaler Informationsverarbeitung verwendet wurde. In den 1950er Jahren fanden sich vier „Kandidaten“ für solche Codes: nebst den zwei schon genannten Vorschlägen von McCulloch und Rapoport die bereits von Adrian ausformulierte Idee des „Frequenzcodes“ (die Zahl der Impulse pro Zeitintervall als Maß für die Stärke eines Reizes) und der „labelled line code“ – was nichts anderes war als die ebenfalls seit Jahrzehnten diskutierte Idee, wonach die an sich gleichen neuronalen Impulse nur durch ihr Vorkommen in unterschiedlichen sensorischen Kanälen ihre entsprechende Bedeutung erhielten. Weitere Kandidaten von „Codes“, die im Verlauf der 1960er Jahre dazu kamen, wurden ebenfalls – wie bei der Diskussion um die neuronale Kanalkapazität – aufgrund theoretischer Überlegungen eingeführt. Beispielfähig dafür ist die Bemerkung von Rapoport an einer Konferenz in Leiden, an der 1962 das Thema des „information processing in the nervous system“ breit diskutiert wurde:

31 von Foerster, H. / Mead, M. / Teubner, H. I., 1951, 20f.

„This idea [a pattern code] is very attractive to those who would think of the operation of the nervous system in the language of digital computers, because a fixed temporal pattern, although in principle subject to a continuous deformation, has a strong resemblance to a digital code. It is in fact a generalization of the Morse code. It is also like a template of a key. The discovery of such patterns would immediately pose a challenging decoding problem.“<sup>32</sup>

Während dieser Zeit war die Informatisierung der Neurowissenschaft in vollem Gang und die Suche nach neuen Codes – wie die hier genannte Idee eines „pattern code“, wonach sich wiederholende, komplexe Muster von Impulsen quasi die Botschaft bilden – beschäftigte mehrere damals bekannte Neurowissenschaftler<sup>33</sup>. Doch wie bereits bei Adrian (dessen Kritiker war Sherrington) zweifelten renommierte Neurowissenschaftler an der Bedeutung solcher Erkenntnisse. John Eccles bemerkte auf derselben Konferenz von 1962:

„There is a growing belief that significant information is carried in coded form by this temporal pattern [of impulse discharges]. However, it must be recognized that this temporal pattern is likely to be lost, or at least smeared, when several lines are converging on a neuron, each with its own temporal pattern of impulses, and I would think that several serially arranged smears give complete erasure of a pattern.“<sup>34</sup>

Die Suche nach einem neuronalen Code erreichte gegen Ende der 1960er Jahre ihren Höhepunkt, als sich 1968 die in diesem Feld aktivsten Forscher an einer „work session“ des Neurosciences Research Program<sup>35</sup> trafen. Mit eher ironischem Unterton fragten die Herausgeber zu Beginn „Is the code of the brain about to be broken?“<sup>36</sup>, um gleich danach anzufügen, dass keiner der Teilnehmer noch daran glaube, es gebe so etwas wie einen klar umrissenen neuronalen Code, den man „knacken“ könne. Die Publikation liest sich denn auch wie eine Kapitulation vor der biologischen Vielfalt:

„It follows, then, that we cannot investigate ‚coding‘ or representation of information in nervous systems in general but must begin by studying a multitude of specific examples with sufficient thoroughness and compass to provide a strong foundation for subsequent generalization about modes and properties of ‚neural coding‘.“<sup>37</sup>

32 Vgl. Rapoport A., 1964, 21f.

33 Zu nennen sind u. a. Cornelius Wiersma, William Uttal, Theodore Bullock, P. D. Wall, J. Segundo.

34 Zitiert nach Gerard, R. W. / Duyff, J. W., 1964, 142.

35 Vgl. Perkel, D. H. / Bullock, T. H., 1968.

36 Perkel, D. H. / Bullock, T. H., 1968, 225.

37 Perkel, D. H. / Bullock, T. H., 1968, 231.

Shannon selbst, ebenfalls Teilnehmer an diesem Symposium, war übrigens vom Scheitern „seiner“ Begrifflichkeit in der Neurowissenschaft nicht sonderlich überrascht. Für ihn schien klar, dass die Rede von „Information“ in der Neurowissenschaft nur Sinn mache „in its more colloquial non-Shannon sense; the information we discuss is not necessarily measurable in bits“<sup>38</sup>.

### 3.3. Dem Rauschen einen Sinn abgewinnen

Kanalkapazität und Code waren theoretische Begriffe, die nur schwer mit der biologischen Realität verknüpft werden konnten. Ganz anders war dies mit der Idee des „Rauschens“ (noise), welche sich weit besser dafür eignete, als Mantelbegriff die Unbeständigkeit des biologischen Systems aufzunehmen. Zudem gab es einen von der Informationstheorie unabhängigen und biologienaheren Zugang zu diesem Problem, das – wie bereits bemerkt – in den 1930er Jahren unter dem Stichwort „neuronale Variabilität“ Thema der Neurophysiologie wurde: Paul Fatt und Bernhard Katz verwendeten den Begriff des „biological noise“ im Rahmen ihrer Untersuchungen der Funktionsweise der Synapse<sup>39</sup>. Sie nahmen den biological noise als Ausgangspunkt zur Entschlüsselung der (chemischen) synaptischen Funktion und nicht als Element eines kommunikationstheoretischen Problems.

Sobald aber Rauschen im Sinn von Shannon untersucht werden wollte, war der Zugang zum Problem ein anderer. Beispielhaft dafür ist die Bemerkung von Richard FitzHugh:

„In the process of coding, the statistical fluctuations in the durations of the impulse intervals represent noise in engineering terminology. [...] To some extent, the brain becomes a communication engineer, as the problem of the analysis of a nerve fiber message by the brain is similar to the engineering problem of detection of a signal in a noisy communication channel.“<sup>40</sup>

Das „noisy neuron“ wurde in dieser Perspektive zu einem unzuverlässigen Bauteil, mit dem das gesamte Nervensystem quasi umgehen musste<sup>41</sup> – eine Sichtweise, die mit dem evolutionsbiologischen Paradigma der Optimierung der Funktionen von Organismen an ihre Umwelt nur schwer zu vereinbaren war. Biologisch geprägte Neurowissenschaftler wie Theodore Bullock und Horace

38 Perkel, D. H. / Bullock, T. H., 1968, 237 (Fußnote).

39 Vgl. Fatt, P. / Katz, B., 1950.

40 Vgl. FitzHugh, R., 1956, 933, 939.

41 Beispielhaft dafür Burns, B. D., 1968.



Barlow wandten sich denn auch Ende der 1960er Jahre scharf gegen eine solche kommunikationstheoretisch geprägte Vorstellung.

Vom biologischen Standpunkt aus hatte die Unterscheidung zwischen „signal“ und „noise“ immer ein willkürliches Moment, zumal nicht geklärt ist, welchen biologischen Sinn das Rauschen haben könnte. So erstaunt es nicht, dass bereits in den 1950ern von Neurophysiologen die Terminologie des „Rauschens“ zwar aufgenommen wurde, gleichzeitig aber nach dem biologischen Sinn von „noise“ gefragt wurde<sup>42</sup> – eine Fragestellung, die im Kontext der Begrifflichkeit der Informationstheorie sinnlos ist. So ließ sich auch der Begriff des „Rauschens“ im informationstheoretischen Sinn nicht gewinnbringend in der Neurowissenschaft anwenden. Vielmehr wurde der Begriff unpräzise verwendet, wie bereits Mary Brazier an einer Konferenz von 1962 bemerkte<sup>43</sup>.

### 3.4. Den neuronalen Computer nachbauen

Die Nutzung des Shannon-Schemas für die Generierung sinnvoller neurobiologischer Fragestellung scheiterte demnach, sobald diese Begrifflichkeit im neurophysiologischen Labor nutzbar gemacht werden sollte. Einen solchen „Härtest“ musste die Gehirn-Computer-Analogie<sup>44</sup> (verstanden im weiteren Sinn, also als Ausdruck des epistemischen Ideals der Kybernetik) nie bestehen, denn der „Nachbau“ des Gehirns war damals (und ist heute) keine realisierbare Option. In diesem Sinn geschützt vor der Empirie konnte die Idee, das Gehirn als Computer zu verstehen, eine größere Strahlkraft erreichen.

Wichtig zu bemerken ist, dass bereits zu Beginn der Verwendung dieser Analogie nicht nur darum ging, das Gehirn mit den Konzepten der damals entstehenden Rechner erklären zu wollen<sup>45</sup>. Bereits damals war das Gehirn ein faszinierendes Vorbild für eine ganz neue mögliche Form von Rechner, wobei ein eigentümlicher gedanklicher Zwischenschritt vollzogen wurde: Zuerst wurde mit der Begrifflichkeit der Informationstheorie festgehalten, dass die Bauteile des

42 Beispielhaft dafür Pinneo, L. R., 1966.

43 Vgl. Brazier, M. A., 1963.

44 Der Erste, der diese Analogie verwendet haben soll, war Norbert Wiener (laut Aspray, W., 1985, 124f.)

45 Freilich gab es diese Vorstellung auch. So schrieb der deutsche Kybernetiker Karl Steinbuch: „Unsere Einsicht in die Funktion unseres Denksystems ist gering. Wenn nun plötzlich durch Automaten vergleichbare Eigenschaften erzeugt werden können (künstliche Intelligenz), erschliesst sich dem forschenden Geist ein neuer Weg zum Verständnis des Menschen: nämlich über das Verständnis der Automaten.“ (Steinbuch, K., 1961, V)

Gehirns „unzuverlässig“ sind. Dann aber musste die – auf dieser Grundlage erstaunliche – Tatsache erklärt werden, dass das Gehirn ja offensichtlich gut funktioniert.

John von Neumann war von dieser Idee besonders fasziniert und untersuchte bereits 1956 detailliert die Fragestellung, wie aus unzuverlässigen Komponenten ein funktionierendes System generiert werden konnte<sup>46</sup>. Auf dem Hixon-Symposium 1948 machte von Neumann klar, dass es deutliche Unterschiede zwischen Gehirn und Computer gab und er lieber Ersteres als Vorbild für Letzteres ansehen wollte:

„It is very obvious that the brain differs from all artificial automata that we know; for instance, in the ability to reconstruct itself (as in the case of mechanical damage). It is always characterized by a very great flexibility in the sense that animals with look reasonably alike and do the same thing may do it by rather different cerebral mechanisms. Furthermore, though all humans belong to the same category and do the same things, outwardly, in some cases they are using different cerebral mechanisms for the same things, so there seems to be a flexibility of pathways.“<sup>47</sup>

McCulloch äußerte sich am Hixon-Symposium ähnlich, indem er die zahlreichen Vorteile des „biologischen Computers“ hervorstrich: „Neurons are cheap and plentiful. [...] They operate with comparatively little energy.“<sup>48</sup> So muss festgehalten werden, dass diese Exponenten der Konzeptualisierung von Information sich für das epistemische Ideal der Kybernetik gar nicht so sehr interessierten. Vielmehr waren sie von der bionischen (d. h. die Natur zum Vorbild nehmenden) Inspiration fasziniert, obgleich die Funktionen des biologischen Originals damals von keinem der zahlreichen Ansätze (wie die damals entstandenen ersten neuronalen Netzwerke) auch nur annähernd erreicht wurden<sup>49</sup>.

46 Von Neumann, J. 1956.

47 Vgl. Jeffres, L. A., 1951, 109.

48 Vgl. McCulloch, W., 1951.

49 Beispielhaft dafür ist die Bemerkung des Kybernetikers Ross Ashby: „What has been found by computer studies in the last ten years thus suggests that one central problem of the ‚higher‘ functions in the brain is to discover its methods for processing information. The methods we know today tend to be inefficient to ‚astronomical‘ degree: the living brain may well know better.“ (Ashby, W. R., 1966, 104)

#### 4. Schlussfolgerung und Ausblick

Das Fazit dieser Betrachtungen mag auf den ersten Blick erstaunen: Die konzise Umsetzung der Informatisierung des Gehirns im Zeitraum 1940 bis ca. 1970 scheiterte. Ab den 1960er Jahren häuften sich die skeptischen Kommentare selbst jener, die sich der Nutzung des Informationsvokabulars verpflichtet fühlen. Bereits 1962 äußerte Mary Brazier: „In closing, let me say that the application of quantitative information theory to neurophysiology lies largely in the future.“<sup>50</sup> Sie sah die Informationstheorie als einen Ansatz an, der neue Ideen, aber kaum neue Fakten gebracht hatte, wobei hier angemerkt werden muss, dass das Potenzial neuer Ideen gegen Ende der 1960er weitgehend erschöpft erschien. George Moore, eine zentrale Figur in der Entwicklung statistischer Methoden für die Untersuchung neurowissenschaftlicher Phänomene, bedauerte 1966 die enttäuschende Ausbeute an Resultaten aus der Nutzung der Informationstheorie in der Neurowissenschaft. Zahlreiche weitere solche Kommentare finden sich in jener Zeit, wobei das 1969 geäußerte Statement von K. N. Leibovic exemplarisch ist:

„I submit that ‚information theory‘ in the sense of Shannon or Wiener is too restrictive for our purposes. [...] Shannon's theory is, of course, quite relevant to problems of signal transmission, including channel capacity and coding. But, when one is dealing with biological information in the broad sense, it is well not to identify ‚information‘ with a narrow definition from engineering science.“<sup>51</sup>

Bedeutete dieses ernüchternde Fazit das Ende der Informatisierung des Gehirns? Gewiss verschob ab den 1970er Jahren ein Großteil der Forschenden ihr Interessensfeld aufgrund der neuen Möglichkeiten der molekularen Genetik. Doch der Blick auf die jüngere Geschichte zeigt eine zweite Phase der Informatisierung. So zeigen bibliometrische Studien und eine Analyse von Zeitschriften eine deutliche Zunahme des Vorkommens der Informationsbegrifflichkeit in Publikationen und der Gründung entsprechender Zeitschriften seit etwa Mitte der 1980er Jahre<sup>52</sup>. Grund ist zum einen das gestiegene Interesse an sog. neuronalen Netzwerken, die sich als Forschungsgegenstand der Computerwissenschaften etabliert haben. Zum anderen – und das ist für die Einschätzung der künftigen Entwicklung bedeutsamer – werden vermehrt Computermodelle zur Simulation

50 Brazier, M. A., 1963, 240.

51 Leibovic, K. N., 1969, 335f.

52 Vgl. Christen, M., 2006, Kap. 4.

der Funktion einzelner Neuronen und ganzer Neuronenverbände eingesetzt<sup>53</sup>. Mit der damit einhergehenden Reduktion des biologischen Systems auf komplexe Gleichungssysteme wird es gleichzeitig möglich, der von der Informationstheorie geforderten Präzision Rechnung zu tragen. Signal und noise werden abgrenzbar und kontrollierbar und die Rede von einem neuronalen Code gewinnt hier einen neuen Sinn – freilich ohne damit zu einem übergreifenden Konzept zu werden.

Dieser Simulationsansatz geht übrigens weit über die Neurowissenschaft hinaus. Zahlreiche andere biologische Prozesse (wie z. B. die Regulation des Genoms oder die Morphogenese während der Embryonalentwicklung) werden zunehmend als Prozesse verstanden, in denen „Information“ gelesen, weitergeleitet oder transformiert werden. Die gewaltige, heute zur Verfügung stehende Rechenkraft im Verbund mit der Möglichkeit, z. B. mittels Robotik biologienahe Systeme nachzubauen, verhilft heute dem kybernetischen Ideal zu neuem Glanz. Der Nachbau biologischer Systeme *in silico* oder gar in Form ausgefeilter Roboter beschäftigt weltweit immer mehr Wissenschaftler.

Dies dürfte sowohl für die wissenschaftliche Praxis als auch für die Beurteilung der technischen Produkte, die aus dieser Wissenschaft entstehen werden (beispielsweise Brain-Computer-Interfaces) Auswirkungen haben, die derzeit erst in den Ansätzen verstanden sind. So wird die Nutzung des Computers als komplexes Modeling-Tool in immer mehr natur- und auch sozialwissenschaftlichen Disziplinen die Ausbildung künftiger Wissenschaftsgenerationen mehr und mehr prägen. Für die Neurowissenschaft bedeutet das, dass die in der ersten Phase der Informatisierung des Gehirns noch klar hervorgetretene Trennung zwischen der biologischen Widerspenstigkeit des biologischen Vorbilds und dessen theoretischen Modellen verschwimmen könnte. Denkbar ist aber auch, dass diese Kluft auf der Ebene der Anwendung neu und mit noch unklaren Konsequenzen auftreten kann, denn die Nutzung beispielsweise eines Brain-Computer-Interfaces wird nicht nur aufgrund der Beherrschung der signaltechnischen Herausforderungen beurteilt, sondern auch, wie dieses in das innere Erleben der betroffenen Person integriert wird<sup>54</sup>. Ein zunehmend wissenschaftliches Verständnis des „informatisierten Gehirns“ bedeutet nicht, dass dessen Träger diese Technologie mit weniger Widerspenstigkeit auch nutzen will.

53 Ein Beispiel dafür ist das Blue Brain Project der ETH Lausanne – der Versuch, die Struktur und Dynamik einer ganzen kortikalen Säule (rund 10.000 Neuronen) im Computer nachzubilden. Vgl. <http://bluebrain.epfl.ch>.

54 Vgl. dazu das Beispiel des Cochlea-Implantats in Christen, M., 2005.

## Literatur

- Abeles M. / Lass Y., 1975: Transmission of information by the axon. II. The channel capacity, in: *Biological Cybernetics* 19, 121–125.
- Adrian, E. D., 1928: *The basis of sensation*, London.
- Adrian, E. D., 1932: *The mechanism of nervous action*, Philadelphia.
- Adrian, E. D. / Zotterman Y., 1926: The impulses produced by sensory nerve-endings. Part 2: The response of a single end-organ, in: *Journal of Physiology* 61, 151–171.
- Ashby, W. R., 1966: Mathematical models and computer analysis of the function of the central nervous system, in: *Annual Review of Physiology* 28, 89–106.
- Aspray, W., 1985: The scientific conceptualization of information. A survey, in: *Annals of the History of Computing* 7, 117–140.
- Brazier, M. A., 1963: How can models from information theory be used in neurophysiology?, in: Fields, W. S. / Abbott, W., 1963, 230–242.
- Burns, B. D., 1968: *The uncertain nervous system*, London.
- Cherry, C., 1956 (Hg.): *Information theory*, London.
- Christen, M., 2005: Der Einbau von Technik in das Gehirn. Das Wechselspiel von Informationsbegriffen und Technologieentwicklung am Beispiel des Hörens, in: Orland, B., 2005, 197–218.
- Christen, M., 2008: Varieties of publication patterns in neuroscience at the cognitive turn, in: *Journal of the History of the Neurosciences* 17, 207–225.
- Duhem, P., 1978, *Ziel und Struktur der physikalischen Theorie*, Hamburg.
- Färber, G., 1968: Berechnung und Messung des Informationsflusses der Nervenfasern, in: *Kybernetik* 1 / 1968, 17–29.
- Fatt, P. / Katz B., 1950: Some observations on biological noise, in: *Nature* 166, 597f.
- Fields, W. S. / Abbott, W., 1963 (Hg.): *Information storage and neural control*, Springfield (Ill.).
- FitzHugh, R., 1956: The statistical detection of threshold signals in the retina, in: *The Journal of General Physiology* 40, 925–947.
- Forbes, A. / Gregg, A., 1915: Electrical studies in mammalian reflexes. 1. The flexion reflex, in: *American Journal of Physiology* 37, 118–176.
- Garson, J., 2003: The introduction of information into neurophysiology, in: *Philosophy of Science* 70, 926–936.
- Gasser, H. S. / Erlanger, J., 1922: A study of the action currents of nerve with the cathode ray oscillograph, in: *American Journal of Physiology* 62, 496–524.
- Gerard, R. W. / Duff, J. W., 1964 (Hg.): *Information processing in the nervous system*, Amsterdam u. a.
- Hagner, M. / Hörl, E., 2008: *Die Transformation des Humanen. Beiträge zur Kulturgeschichte der Kybernetik*, Frankfurt a. M.
- Hardcastle V. G. / Stewart C., 2003: Neuroscience and the art of single cell recording, in: *Biology and Philosophy* 18, 195–208.

- Jacobson H., 1950: The information capacity of the human ear, in: *Science* 112, 143f.
- Jacobson H., 1951: The information capacity of the human eye, in: *Science* 113, 292f.
- Jeffress, L. A., 1951 (Hg.): *Cerebral mechanisms in behavior. The Hixon Symposium*, New York.
- Kay, L. E., 2000: *Who wrote the book of life? A history of the genetic code*, Stanford.
- Leibovic, K. N., 1969: *Information processing in the nervous system*, Berlin u. a.
- MacKay, D. M. / McCulloch W., 1952: The limiting information capacity of a neuronal link, in: *Bulletin of Mathematical Biophysics* 14, 127–135.
- McCulloch, W., 1951: Why the mind is in the head, in: Jeffress, L. A., 1951, 42–57.
- McCulloch, W. / Pitts, W., 1943: A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity, in: *Bulletin of Mathematical Biophysics* 5, 115–133.
- Neumann, J., 1956: Probabilistic logics and the synthesis of reliable organisms from unreliable components, in: Shannon, C. E. / McCarthy, J., 1956, 43–98.
- Orland, B., 2005 (Hg.): *Artifizielle Körper – lebendige Technik. Technische Modellierungen des Körpers in historischer Perspektive (Interferenzen – Studien zur Kulturgeschichte der Technik 8)*, Zürich.
- Perkel, D. H. / Bullock, T. H., 1968: Neural coding, in: *Neuroscience Research Progress Bulletin* 6, 221–348.
- Pias, C., 2003: *Cybernetics – Kybernetik. The Macy Conferences 1946–1953, Bd. 1: Transactions / Protokolle*, Zürich u. a.
- Pias, C., 2004: *Cybernetics – Kybernetik. The Macy Conferences 1946–1953, Bd. 2: Essays and Documents*, Zürich u. a.
- Pinneo, L. R., 1966: On noise in the nervous system, in: *Psychological Review* 73, 242–247.
- Rapoport, A., 1964: Information processing in the nervous system, in: Gerard, R. W. / Duff, J. W., 1964, 16–23.
- Rapoport, A. / Horvath, W., 1960: The theoretical channel capacity of a single neuron as determined by various coding systems, in: *Information and Control* 3, 335–350.
- Rosenblueth, A. / Wiener, N., 1950: Purposeful and non-purposeful behaviour, in: *Philosophy of Science* 17, 318–326.
- Shannon, C. E., 1948: A mathematical theory of communication, in: *The Bell Systems Technical Journal* 27, 379–423.
- Shannon, C. E. / McCarthy, J., 1956 (Hg.): *Automata studies*, Princeton.
- Shepherd, G. M., 1991: *Foundations of the neuron doctrine*, Oxford.
- Sherrington, C. S., 1951: *Man on his nature*, 2. Aufl., Cambridge (Mass.).
- Steinbuch, K., 1961: *Automat und Mensch. Über menschliche und maschinelle Intelligenz*, Berlin u. a.
- von Foerster, H. / Mead, M. / Teuber, H. L., 1951 (Hg.): *Cybernetics. Circular causal and feedback mechanisms in biological and social systems. Transactions of the seventh conference (March 23–24, 1950)*, New York.

Wall, P. D. / Lettvin, J. Y. / McCulloch, W., Pitts, W., 1956: Factors limiting the maximum impulse transmitting ability of an afferent system of nerve fibres, in: Cherry, C., 1956, 329-344.

Wiener, N., 1948: Cybernetics, or control and communication in the animal and the machine, Cambridge (Mass.).